

基于新型配网低压架空线路验电接地装置 故障诊断与测量技术

苏一峰¹, 胡鸿宇², 邹宇¹, 黄尉², 白娟¹

(1.广西电网有限责任公司钦州供电局,广西 钦州 535000;

2.广西电网有限责任公司钦州新区供电局,广西 钦州 535000)

摘要:为改善低压架空线路故障诊断效果,提高接地线操作的安全性,研究基于新型配网低压架空线路验电接地装置故障诊断与测量技术。在分析新型配网低压架空线路验电接地装置结构的基础上,利用其测量配网低压架空线路是否有电,以安全执行接地线挂、拆操作。利用传感器获取其运行电压信号,采用小波包分析法对其作多尺度分解处理,获取验电接地装置故障特征后,将其输入到基于自组织映射(self-organizing map, SOM)神经网络的故障诊断模型中,实现验电接地故障类型的识别。实验结果表明,验电接地装置故障时,其电压信号波动频率加快,波动幅度差异较大;该技术可实现其电压信号特征的提取,并诊断其故障类别,诊断效果突出;该技术可对配网低压架空线路做是否有电测量,实现接地刀闸状态的监控与控制。

关键词:低压架空线路;验电接地装置;故障诊断与测量;电压信号;小波包;SOM神经网络

中图分类号:TP183;TM933 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)08-0025-05

Fault Diagnosis and Measurement Technology of Grounding Device for Low Voltage Overhead Lines in New Distribution Networks

SU Yifeng¹, HU Hongyu², ZOU Yu¹, HUANG Wei², BAI Juan¹

(1. Power Supply Bureau of Qinzhou, Qinzhou 535000, China;

2. Power Supply Bureau of Qinzhou-Xinqu, Qinzhou 535000, China)

Abstract: This paper researches on fault diagnosis and measurement technology for the grounding device of low-voltage overhead lines in the new distribution network, to improve its fault diagnosis effect and enhance the safety of grounding wire operation. On the basis of analyzing the structure of the new low-voltage overhead line inspection grounding device in the distribution network, it is used to measure whether there is electricity in the low-voltage overhead line of the distribution network, in order to safely carry out grounding wire hanging and dismantling operations. Using sensors to obtain its operating voltage signal, wavelet packet analysis is used to perform multi-scale decomposition processing on it. After obtaining the fault characteristics of the electrical grounding device, it is input into a fault diagnosis model based on self-organizing map (SOM) neural network to achieve the identification of electrical grounding fault types. The experimental results show that when the electrical grounding device malfunctions, the frequency of voltage signal fluctuation increases and the amplitude of fluctuation varies greatly. This technology can extract the characteristics of its voltage signal and diagnose its fault category, with outstanding diagnostic effectiveness. It is possible to measure the presence of electricity on low-voltage overhead lines in the distribution network, achieving control and monitoring of the status of the grounding switch.

Keywords: low-voltage overhead lines; electrical grounding device; fault diagnosis and measurement; voltage signal; wavelet packet; self-organizing map neural network

0 引言

智能电网战略的实施,使得电网的智能化建设水平获得显著提升^[1],电气设备逐步向智能化、自动化方向发展,但仍有部分电气操作存在严重风险,挂、拆接地线操作便是其中之一^[2]。传统配网低压架空线路检修时,电力

检修人员首先要依靠各种绝缘工具对检修电路做验电、放电处理,在线路“无电”情况下方能开始挂接地线,在整个过程中,即便出现微小失误,也可能会带来极其严重的后果^[3]。接地线是保护检修人员人身安全的重要屏障,不容出一丝一毫的纰漏^[4]。新型配网低压架空线路验电接地装置的使用不仅能够对配网低压线路进行统一管理,而且可以实时监控接地线以及接地刀闸的状态信息,为配网运行提供安全保障^[5-6]。作为测量配网低压架空线路

*基金项目:国家南方电网有限公司科技项目(040600KK52200005)

收稿日期:2023-11-28

是否有电的智能化装置,因工作环境和自身元件等因素影响而产生故障不可避免,采取智能化手段快速诊断其故障类型及故障原因对保证配网安全意义重大^[7]。

李云鹏等^[7]通过信息聚类技术获取装置数据,在对其预处理后,运用并行计算方法对不同故障信息进行分析,通过判别函数确定装置产生故障的概率,从而实现不同类别故障的诊断,该方法可取得较高的处理效率,但故障诊断精度难以达到要求;朱少斌等^[8]将反向传播(back-propagation, BP)神经网络应用到计量装置故障诊断中,并利用天牛群算法对故障诊断模型参数进行寻优,但受BP神经网络结构的限制,装置故障诊断效果仍不理想。为解决上述研究存在的问题,本文研究基于新型配网低压架空线路验电接地装置故障诊断与测量技术,以提高验电接地装置故障诊断效果。

1 新型配网低压架空线路验电接地装置故障诊断与测量

1.1 新型配网低压架空线路验电接地装置结构

新型配网低压架空线路验电接地装置主要包括电动接地刀闸、直流验电闭锁控制器、显示屏、信号灯、网络交换机、摄像机、温湿度传感器等部件,直流验电闭锁控制器是该装置中最重要的部分,图1为其内部结构图。

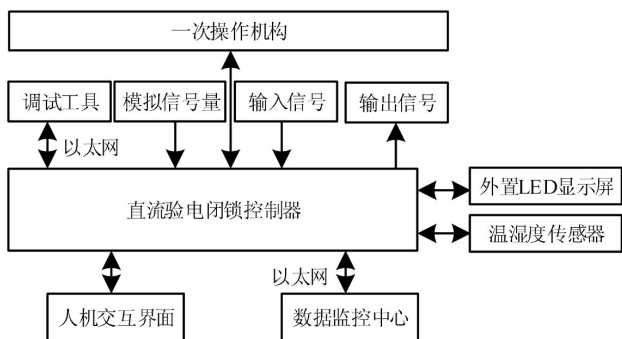


图1 直流验电闭锁控制器内部结构图

直流验电闭锁控制器中除配置有输入、输出、通信接口外,还设计了配网低压架空线路电压测量回路,利用RS485接口将其连接在发光二极管技术显示器(monitor of light emitting diode, LED)上,可实现配网低压架空线路电压的可视化呈现。同时,直流验电闭锁控制器可通过RS485数据接口获取温湿度传感器采集的配网低压架空线路验电接地装置柜温度信息与湿度信息,实现装置柜温湿度的管理与控制。通过直流验电闭锁控制器的通信接口可与网络交换机建立数据通信通道,将验电接地装置上的所有数据传输给数据监控中心。将摄像机安装在验电接地装置上,可实时获取电动刀闸分合视频信息,达到智能监控目的。

1.2 基于验电接地装置的配网低压架空线路电压测量

采用验电接地装置对配网低压架空线路电压进行测量,测量流程如下:

(1) 数据监控中心下达“验电”命令,并传输给直流验电闭锁控制器。

(2) 直流验电闭锁控制器响应获取的命令信息,开始对配网低压架空线路做电压检测,若测量电压小于设定有电阈值,则将配网低压架空线路“无电”信息上传给数据监控中心。若测量电压大于设定有电阈值时,控制器会继续对刀闸合闸状态进行检测,当刀闸处于开启状态时,则认定配网低压架空线路电压正常,将“有电”信息上传至数据监控中心;当刀闸处于闭合状态时,控制器将给放电器下达放电命令,当限定时间内配网低压架空线路电压低于设定阈值后,表明放电器完成放电处理,此时,控制器将“无电”信息传输给数据监控中心;经过一段时间的放电操作,配网低压架空线路电压仍高于有电阈值,则认定配网低压架空线路“有电”,将有电信息上传至数据监控中心。

(3) 当数据监控中心接收到“有电”信息后,接地刀闸的“合闸”动作将受到限制;反之,当数据监控中心接收到“无电”的反馈信息后,才会给直流验电闭锁控制器下达“接地刀闸合闸”命令。

(4) 控制器接收数据监控中心指令信息后,控制接地刀闸完成合闸,并对刀闸状态进行实时检测,确定其成功合闸后,将信息上传给数据监控中心。

(5) 数据监控中心收到反馈信息后,即完成配网低压架空线路电压测量。

1.3 配网低压架空线路验电接地装置故障诊断

配网低压架空线路验电接地装置故障通常表现为内部元件的损坏,直通、开路故障是最主要的两种故障类型,一旦验电接地装置出现直通故障,便可使内部元件连接通路断开,故通过分析验电接地装置的开路故障,即可全面知悉其重要故障信息。在对验电接地装置进行运行监测时,其输出电流、电压是非常重要的监测变量。受配网低压架空线路及其自身结构的影响,验电接地装置输出电流一般存在延迟问题,且因谐波干扰具有较大波动。因此,本文利用传感器对验电接地装置的输出电压信号进行采集后,采用小波包对其电压信号进行分解分析,提取其故障特征后,运用SOM神经网络对其故障特征进行识别,以获得故障诊断效果的提升。

1.3.1 基于小波包的验电接地装置故障特征提取

小波分析法能够对信号的时域、频域信息作多尺度分解,完成其特征参数的获取,因此,在非平稳信号特征

提取中具有广泛应用^[9-10]。采用小波变换对验电接地装置的输出电压信号进行分解,分解公式描述为:

$$\begin{cases} c_{g,k} = \sum_{n=1}^{N_1} h_0(n-2k)c_{g-1,n} \\ d_{g,k} = \sum_{n=1}^{N_1} h_1(n-2k)c_{g-1,n} \end{cases} \quad (1)$$

式中,验电接地装置的输出电压信号的分解总层数表示为 $n, n=1, 2, \dots, N_1$,取值为正整数;分解尺度为 $g, g=1, 2, \dots, n$;参数 $k=0, 1, \dots, 2^{n-g}$;验电接地装置的输出电压信号的逼近结果用 c 表示;信号的细节信息表示为 d ;高通滤波系数表示为 $h_1(\cdot)$ 表示;低通滤波系数表示为 $h_0(\cdot)$ 。

小波分解的缺点是无法分解信号的高频部分,小波包分解法则弥补了小波分解的不足^[11],利用其多尺度分解信号高、低频信息能力,可实现更精细验电接地装置故障特征的有效提取,对后续故障诊断精度的提高产生有利影响。 $\varphi(t)$ 和 $\phi(t)$ 为正交尺度函数和波函数,小波包二尺度分解式为

$$\varphi(t) = 2^{\frac{1}{2}} \sum_{p=1}^P h_{0,p} \varphi(2t-p) \quad (2)$$

$$\phi(t) = 2^{\frac{1}{2}} \sum_{p=1}^P h_{1,p} \phi(2t-p) \quad (3)$$

式中,在多分辨率分析下,高通滤波器系数表示为 $h_{1,p}$,低通滤波器系数表示为 $h_{0,p}$;时间参量表示为 t ,小波包对验电接地装置的输出电压信号分解的总层数表示为 p 。

通过继续对式(2)、式(3)进行推广,可得:

$$\omega_{2p}(t) = 2^{\frac{1}{2}} \sum_{p=1}^P h_{0,p} \omega_p(2t-p) \quad (4)$$

$$\omega_{2p+1}(t) = 2^{\frac{1}{2}} \sum_{p=1}^P h_{1,p} \omega_p(2t-p) \quad (5)$$

式中,小波包函数通过 $\omega_p(t)$ 表示,其偶数项表示为 $\omega_{2p}(t)$,其奇数项表示为 $\omega_{2p+1}(t)$ 。

设定 $p=0$,则 $\omega_0(t)=\varphi(t)$, $\omega_1(t)=\phi(t)$ 。利用 $\omega_0(t)=\varphi(t)$ 可得到的小波包函数集合为 $\{\omega_p(t)\}_{p \in \mathbb{Z}^+}$ 。

1.3.2 SOM神经网络的验电接地装置故障诊断

SOM神经网络具有无监督训练特点,基本结构如图2所示。SOM神经网络工作原理为:搜寻输入神经元合适的输出神经元,在获得输入变量和权变量最优逻辑关系的过程中选择最合适的神经元,再将其视为圆心,采取兴奋性反馈机制处理其周边邻近神经元,以抑制性反馈机制对待距离其较远的神经元,从而实现故障特征的聚类处理,达到不同故障诊断识别目的。本文构建基于SOM神经网络的验电接地装置故障诊断模型,将获取的验电接地装置电流、电压信号特征作为其输入,实现验电

接地装置故障类型的有效识别。

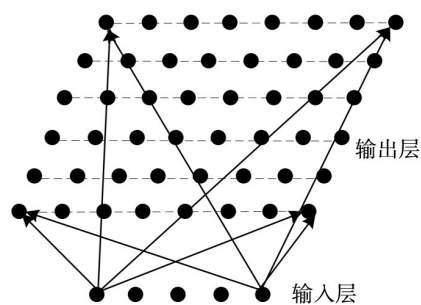


图2 SOM神经网络基本结构

SOM神经网络训练时,需先对连接权系数 w_{ij} 进行设定,取值为 $[0, 1]$, $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 表示验电接地装置故障特征,将其作为模型输入后,必能找到与 X 、权变量 W_i 最适合的输出神经元 C ,模型训练过程如下:

(1) 对故障诊断模型输入进行设定。验电接地装置故障特征表示为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,输入神经元的权向量通过 $W_i=[w_{i0}, w_{i1}, \dots, w_{in}]^T$ 表示,无反馈条件下 i 神经元的最终输出结果为

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j = W_i^T X \quad (6)$$

(2) 确定对应最大 y_i 的神经元 i ,将其视为最适合的输出神经元 C 。

(3) 为确保基于SOM神经网络的验电接地装置故障诊断模型能有突出的聚类效果,设定 N_c 为 C 的邻域,并设定 N_c 内神经元输出结果为1,其他为0,则

$$\begin{cases} y_i = 1, i \in N_c \\ y_i = 0, i \notin N_c \end{cases} \quad (7)$$

(4) 对权值进行训练,即

$$\begin{cases} w_{ij}(t+1) = [1-a(t)]w_{ij}(t) + a(t)x_j(t), i \in N_c \\ w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t), i \notin N_c \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a(t)$ 为学习系数,取值为 $(0, 1)$ 。完成 $w_{ij}(t)$ 的训练后,退回到步骤(2),当 $a(t)$ 或 N_c 符合设定条件后即可停止训练。

(5) 故障诊断模型逐个对验电接地装置故障特征进行学习,直至遍历所有故障特征后,算法结束。

故障诊断模型训练完后,每个神经元仅对部分输入故障特征具有敏锐感知能力,通过对最大输出神经元进行故障标记,即可实现验电接地装置故障类型和故障原因的识别。

2 结果与分析

以某一新型配网低压架空线路验电接地装置为研究对象,对其日常运行电压、电流数据进行获取,构建样本数据集,数据总量为10 000,其中含有5类样本数据,对应

16个故障模式,数据样本的具体故障类别如表1所示。以9:1比例划分训练样本,测试样本,采用本文方法对验电接地装置进行故障诊断后,利用该装置测量配网低压架空线路电压,分析本文方法的故障诊断性能与测量效果。

表1 数据样本故障类型

编号	故障编码	故障类型	编号	故障编码	故障类型
1	A	正常	9	D1	ST1与ST3
2	B1	ST1	10	D2	ST1与ST2
3	B2	ST2	11	D3	ST2与ST4
4	B3	ST3	12	E1	ST1与ST2
5	B4	ST4	13	E2	ST2与ST3
6	B5	ST5	14	E3	ST3与ST4
7	C1	ST1与ST4	15	E4	ST4与ST5
8	C2	ST2与ST5	16	E5	ST5与ST1

从数据集中选取验电接地装置正常运行、B1故障、C2故障下的电压信号样本数据,通过对3种不同电压信号波形进行对比分析,研究电压信号作为验电接地装置故障诊断依据的必要性,实验结果如图3所示。

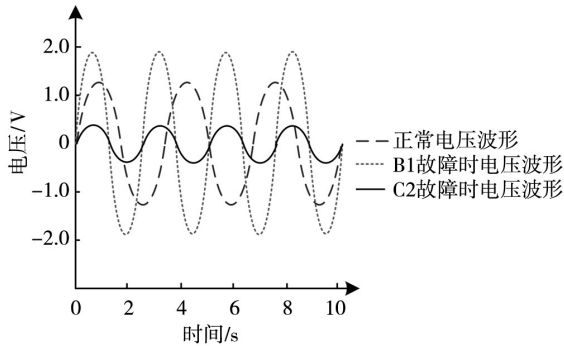


图3 不同状态验电接地装置电压信号波形分析

分析图3可知,验电接地装置处于不同工作状态时,其电压信号波形存在一定差异,相比正常运行状态电压波形,该装置发生故障后的电压信号波形变化幅度较大,发生B1故障时,其电压幅值呈现出大幅增长态势,且在同一周期内,电压波动速率加快。当发生C2故障时,其电压幅度呈减小规律变化,且波动频率增快。因此,将验电接地装置的电压信号作为其故障诊断依据是可行的。

采用本文方法对验电接地装置电压信号进行故障特征提取,实验结果如表2所示。分析表2可知,采用本文方法对验电接地装置电压信号特征进行提取,能够实现电压信号高、低频部分的分解,得到8个不同尺度的电压信号特征向量。实验结果表明,本文方法可实现验电接地装置故障特征的提取。

完成故障特征的提取后,将其作为故障诊断模型输入,通过对模型训练结果以及最终故障诊断结果进行分析,结果如图4、表3所示。分析图4可知,将验电接地装置故障特征输入到故障诊断模型后,可完成模型的训练,训练后模型的输出层为一个9×9网格,其中共有81个神

经元,通过确定与输入特征、权变量最适合的输出神经元完成验电接地装置故障类别的标记,标记结果为代表故障类别的编码。由表3得出,本文方法可实现验电接地装置故障类型的有效识别,正常样本、故障样本识别结果准确率高。实验结果表明,本文方法具有验电接地装置故障诊断能力,诊断效果突出。

表2 验电接地装置故障特征提取结果

序号	特征变量							
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
1	1.25	0.65	0.82	0.95	0.73	0.18	0.4	0.1
2	0.52	0.07	0.15	0.37	0.61	0.2	0.53	—
3	1.96	0.44	0.11	4.01	0.96	0.83	0.48	0.12
4	2.11	0.74	0.12	3.11	0.68	0.32	0.55	0.05
5	2.56	0.72	0.94	0.75	0.72	0.52	0.44	0.05
6	1.66	0.09	0.73	0.82	0.80	0.26	0.65	0.05
7	1.53	0.58	0.64	0.84	0.52	0.38	0.61	0.1
8	1.41	0.61	0.75	0.75	0.24	1.54	0.88	0.05
9	1.38	0.85	0.13	0.88	1.55	0.28	1.63	0.05
10	1.68	0.46	0.68	0.55	0.53	0.79	0.21	—

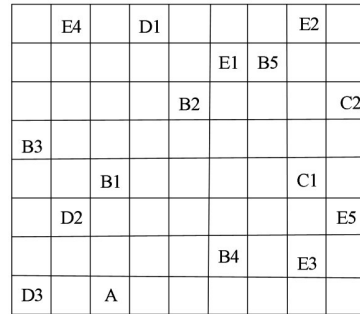


图4 故障诊断模型训练结果分析

表3 验电接地装置故障诊断结果分析

故障类型	数量/个	正确诊断/个	错误诊断/个	故障类型	数量/个	正确诊断/个	错误诊断/个
A	120	120	0	D1	60	60	0
B1	80	80	0	D2	50	50	0
B2	50	49	1	D3	60	60	0
B3	40	38	2	E1	45	45	0
B4	60	60	0	E2	55	55	0
B5	50	50	0	E3	75	73	2
C1	80	78	2	E4	65	64	1
C2	40	40	0	E5	70	70	0

利用验电接地装置对3条配网低压架空线路电压进行测量,通过对不同时刻线路电压测量结果进行分析,验证本文方法的测量效果,实验结果如图5所示。分析图5可知,本文方法可获取不同时刻配网低压架空线路电压,当线路电压低于设定阈值后,方能对接地刀闸进行合闸

(下转第56页)